

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

СИСАК ІВАН МИХАЙЛОВИЧ

УДК 621.3.032

**РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ РОЗРЯДНИХ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА
ВИСОКОЧАСТОТНИМИ ЕЛЕКТРОННИМИ
ПУСКОРЕГУЛЮВАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ**

05.09.07 – світлотехніка та джерела світла

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі електротехніки Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Лупенко Анатолій Миколайович,
завідувач кафедри електротехніки
Тернопільського національного технічного
університету імені Івана Пулюя.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кожушко Григорій Мефодійович,
завідувач кафедри товарознавства непродовольчих
товарів Вищого навчального закладу Укоопспілки
«Полтавський університет економіки і торгівлі»;

кандидат технічних наук, доцент
Поліщук Валентина Миколаївна,
декан факультету електропостачання і освітлення міст
Харківського національного університету міського
господарства імені О.М. Бекетова.

Захист відбудеться “25” грудня 2013 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради **K58.052.04** у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України за адресою: 46001, Україна, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, корпус № 2, ауд. 79.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України за адресою: 46001, Україна, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розіслано “22” листопада 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Коваль В.П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним із основних шляхів підвищення енергоефективності у світлотехнічній галузі є широке впровадження розрядних джерел світла (РДС) у системах і пристроях внутрішнього та зовнішнього освітлення. Живлення таких РДС від промислової мережі здійснюється за допомогою електронних пускорегулювальних апаратів (ЕПРА), причому в останні два десятиліття спостерігається інтенсивний перехід від традиційних електромагнітних апаратів до високочастотних ЕПРА. Такі ЕПРА фактично виконують функцію силового інтерфейсу, забезпечуючи «комфортні» умови функціонування РДС, з одного боку, та промислової мережі – з іншого. Сучасні ЕПРА мають високий коефіцієнт корисної дії та забезпечують високу якість споживання електроенергії шляхом корекції форми струму мережі живлення, мають кращі масогабаритні показники, економлять такі гостродефіцитні матеріали, як мідь, електротехнічну сталь. Завдяки високій робочій частоті ЕПРА (30–100 кГц) РДС збільшує світлову віддачу на 15÷20 %, що дає змогу продовжити термін служби, підвищити якість та комфортність освітлення.

Суттєвою перевагою ЕПРА над традиційними пускорегулювальними апаратами є здатність регулювання потужності, споживаної в РДС, тобто їх світлового потоку, що служить основою для побудови сучасних високоякісних автоматизованих систем керування освітленням. Тому в останні десятиліття значну увагу науковці багатьох країн приділяють питанням дослідження методів регулювання потужності РДС.

Розвитку теоретичних та прикладних аспектів регулювання потужності РДС за допомогою ЕПРА сприяли роботи таких відомих вчених, як Айзенберг Ю.Б., Краснопольський О.Є., Кликов М.Є., Кунгс Я.А., Обжерін Є.А., Панфілов Д.І., Поляков В.Д., Фугенфіров М. І., F.C. Lee, B.R. Lin, C.S. Moo, H.C. Yen, N. Onishi, J. Qian, T.J. Ribarich, F. Тао та ряду інших.

Не зважаючи на значні здобутки у вирішенні науково-практичної проблеми регулювання потужності РДС, є ще цілий ряд нерозв'язаних задач, які потребують свого вирішення. До них слід віднести: систематизоване дослідження методів регулювання світлового потоку РДС за допомогою ЕПРА у широкому діапазоні потужності; дослідження впливу ЕПРА на такий важливий параметр, як коефіцієнт амплітуди струму РДС, від якого суттєво залежить термін служби РДС та гармонічного складу струму РДС, що впливає на електромагнітну сумісність освітлювальної апаратури; дослідження пікових значень напруг і струмів у компонентах ЕПРА у процесі регулювання потужності, які суттєво впливають на показники надійності ЕПРА; врахування впливу втрат у компонентах ЕПРА з метою їх мінімізації та підвищення енергетичної ефективності ЕПРА.

Таким чином, подальший розвиток теоретичних засад та їх експериментальна верифікація стосовно поглиблення досліджень особливостей регулювання потужності РДС високочастотними ЕПРА є **актуальною** задачею вітчизняної світлотехнічної галузі, розв'язання якої дасть змогу підвищити якість і енергоефективність освітлювальних систем та покращити їх технічні й експлуатаційні характеристики.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в рамках наукових тем “Імітаційне моделювання розрядних джерел світла та їх електронних пускорегулювальних апаратів” (номер державної реєстрації 0125U006698) та “Регулювання потужності розрядних джерел світла енергоощадними електронними пускорегулювальними апаратами” (номер державної реєстрації 0111U005287).

Мета й задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є дослідження особливостей регулювання потужності РДС при їх високочастотному живленні на основі розроблених математичних моделей вихідних каскадів ЕПРА та створення ресурсоощадної структури ЕПРА з високою якістю споживання електроенергії.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити математичні моделі вихідного каскаду ЕПРА в часовій області для коливального та аперіодичного режимів його роботи;
- побудувати математичну модель вихідного каскаду ЕПРА в частотній області;
- виконати дослідження особливостей амплітудного, частотного та широтно-імпульсного регулювання потужності РДС;
- дослідити вплив комутаційних та кондуктивних втрат на напруги та струми в компонентах вихідного каскаду ЕПРА;
- розробити ресурсоощадну структуру ЕПРА на основі об'єднання в одному каскаді резонансного інвертора та коректора коефіцієнта потужності, які працюють синхронно.

Об'єкт дослідження – процеси перетворення електричної енергії в колах із розрядними джерелами світла.

Предмет дослідження – методи регулювання потужності РДС при їх високочастотному живленні.

Методи дослідження. Виконані в дисертації дослідження ґрунтуються на аналітичних та чисельних методах аналізу електричних кіл, методах теорії функцій комплексних змінних, методах спектрального аналізу, методах імітаційного та фізичного моделювання електричних кіл із нелінійними елементами.

Числові розрахунки та моделювання проводилися з використанням програмних засобів MathCAD, MATLAB та Micro-Cap.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблено математичні моделі вихідного каскаду ЕПРА в часовій області у вигляді аналітичних виразів для миттєвих значень напруг і струмів у компонентах вихідного каскаду як реакцій на дію вхідних прямокутних імпульсів з довільним коефіцієнтом заповнення як для коливального, так і для аперіодичного режиму роботи вихідного каскаду, що дало змогу проводити його аналіз при довільних значеннях параметрів;
- встановлено аналітичні зв'язки між потужністю РДС та керувальними діями завдяки врахуванню нелінійності вольт-амперних характеристик РДС, які дають змогу дослідити регулювальні характеристики комплексу ЕПРА-РДС для широтно-імпульсного, амплітудного та частотного методів регулювання потужності у широкому діапазоні потужностей;

- розвинуто метод дослідження широтно-імпульсного регулювання потужності РДС, який базується на аналітичному описі діючих значень струмів у навантаженні через їх миттєві значення на часових інтервалах дії вхідного сигналу, що дозволило прогнозувати такі важливі параметри, як коефіцієнт амплітуди, коефіцієнт гармонік струму лампи в процесі регулювання її потужності; пікові значення напруг та струмів у компонентах ЕПРА;

- удосконалено структуру електронного пускорегулювального апарата шляхом об'єднання вузлів корекції коефіцієнта потужності та високочастотного інвертора, які працюють синхронно в одному каскаді, що дало змогу забезпечити параметри якості електроенергії при зменшенні обсягу компонентів електронного пускорегулювального апарата.

Практичне значення отриманих результатів. Запропоновану в роботі методику розрахунку регулювальних характеристик ЕПРА, де використано широтно-імпульсний метод регулювання потужності, впроваджено в ТОВ “ОСП Корпорація ВАТРА”, що дозволило спростити процес і термін проектування ЕПРА та покращити їх характеристики.

Методика, впроваджена в ТОВ «ТКБР “Стріла”», дала змогу розраховувати регулювальні характеристики “коефіцієнт заповнення – потужність” і використовується при проектуванні ЕПРА для керування зовнішнім освітленням міст із покращеними показниками енергоефективності й надійності роботи апаратури.

Результати дисертаційних досліджень також впроваджено в навчальний процес для підготовки магістрів у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за спеціальностями “Світлотехніка та джерела світла” й “Електротехнічні системи електроспоживання”.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В [1, 8, 9] проведено експериментальні дослідження ресурсощадного ЕПРА, у [2, 10, 11] – моделювання часових залежностей та експериментальні дослідження вихідного каскаду в коливальному режимі. В [3, 16] розроблено математичну модель вихідного каскаду в коливальному режимі роботи з урахуванням втрат, у [4, 12, 13] – математичну модель вихідного каскаду в аперіодичному режимі роботи. В [5, 17] запропоновано узагальнену математичну модель вихідного каскаду та проведено її верифікацію шляхом моделювання та експерименту. В [6, 14] виконано експериментальні дослідження методу широтно-імпульсного регулювання потужності люмінесцентної лампи. В [7, 18] проведено аналітичні розрахунки напруг і струмів вихідного каскаду ЕПРА з люмінесцентною лампою. В [15, 19, 20, 21] проаналізовано амплітудний, частотний і широтно-імпульсний методи регулювання потужності натрієвих ламп високого тиску, отримано розрахункові та експериментальні залежності.

Апробація. Основні результати дисертації представлено й обговорено на: III Міжнародній науково-технічній конференції “Світлотехніка й електроніка: історія, проблеми й перспективи” (м. Тернопіль, 20–22 травня 2008 р.); XII науковій конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 14–15 травня 2008 р.); III Міжнародній науково-технічній

конференції “Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах” (м. Луцьк, 28–30 червня 2010 р.); Міжнародній науково-технічній конференції “Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій” (м. Тернопіль, 19–21 травня 2010 р.); X Міжнародній конференції “Контроль і управління в складних системах” (м. Вінниця, 19–21 жовтня 2010 р.); науково-технічній конференції “Сучасний стан і перспективи розвитку світлотехніки та електроенергетики” (м. Тернопіль, 19 травня 2011 р.); XV науковій конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 14–15 грудня 2011 р.); IV Міжнародній науково-технічній конференції “Сучасні проблеми світлотехніки та електроенергетики” (м. Харків, 13–14 квітня 2011 р.); IV Міжнародній науково-технічній конференції “Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи” (м. Тернопіль, 24–26 квітня 2012 р.); XVI науковій конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 5–6 грудня 2012 р.); на семінарах кафедри електротехніки Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя; на семінарі кафедри електроніки і енергетики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи відображено в 21 друкованій праці, у тому числі: 7 статей у фахових наукових виданнях України (1 з яких входить у видання України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 14 – в тезах конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 129 найменувань, містить 51 рисунок, 10 таблиць, 13 додатків. Повний обсяг роботи складає 174 сторінки, основний зміст викладено на 125 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, відзначено її зв'язок із науковими темами, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено об'єкт та предмет дослідження, зазначено методи досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відзначено особистий внесок здобувача, наведено дані апробації та публікацій основних результатів роботи, описано структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У першому розділі на основі огляду літературних джерел проаналізовано особливості сучасних РДС та високочастотних ЕПРА, моделі вихідних каскадів ЕПРА, методи регулювання потужності РДС, сформульовано задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі розроблено математичні моделі вихідного каскаду (ВК), який є одним із основних вузлів високочастотного ЕПРА для живлення РДС і забезпечує високі енергетичні показники комплексу ЕПРА-РДС та удосконалений алгоритм керування лампою. Запропоновані вирази, покладені в основу таких математичних моделей, дають змогу суттєво підвищити точність аналізу ВК ЕПРА, проводити дослідження його електричних режимів з метою вибору параметрів його схеми, досліджувати методи регулювання потужності РДС.

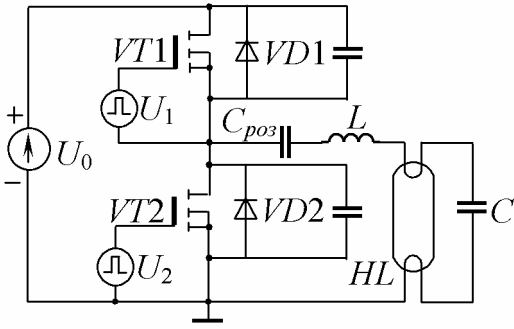


Рис. 1. Схема вихідного каскаду

Найпоширенішою схемою ВК ЕПРА є напівмостовий резонансний інвертор напруги з послідовним коливальним контуром LC , в якому РДС HL під'єднана паралельно до конденсатора C (рис. 1). Ключі (польові МДН-транзистори $VT1$ і $VT2$) почергово комутуються під дією протифазних керуючих напруг U_1 і U_2 , які формуються драйвером високовольтних ключів. Використання в інверторі асиметричного керування ключами забезпечує широкий діапазон регулювання потужності в РДС та комутацію транзисторів при нульовій напрузі. Форма напруги $u(t)$ безпосередньо на вході LC -контур має вигляд, показаний на рис. 2, де T – період високочастотної комутації; n – номер періоду.

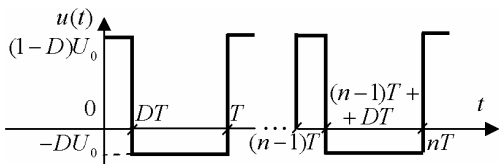


Рис. 2. Напруга на вході коливального контуру

У випадку довільного навантаження або при його зміні в широких межах коливальний контур може працювати в коливальному чи аперіодичному режимах.

Еквівалентна схема ВК за умови відсутності втрат у коливальному контурі наведена на рис. 3, де $R(P)$ – опір РДС при потужності P , яка споживається лампою.

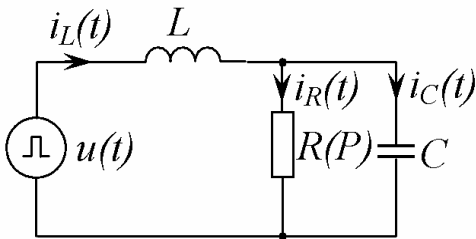


Рис. 3. Еквівалентна схема вихідного каскаду

Проведено аналіз коливального режиму ЕПРА, який має місце, коли корені характеристичного рівняння є комплексно-спряженими

$$p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_{\text{вл}}, \quad (1)$$

де $\alpha = 1/2RC$ – коефіцієнт згасання;

$\omega_{\text{вл}} = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$ – частота вільних згасаючих

коливань; $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – резонансна частота ненавантаженого коливального контуру; $\xi = Z_0/2R$ – параметр згасання; $Z_0 = \sqrt{L/C}$ – характеристичний опір контуру.

Напругу, прикладену до контуру, розглянуто як послідовність прямокутних додатних імпульсів u^+ тривалістю DT і від'ємних імпульсів u^- тривалістю $(1-D)T$, які чергуються між собою (рис. 2). Застосовуючи одиничні ступінчасті функції $1(t)$ з відповідним зміщенням, отримано зображення n -го вхідного додатного і n -го вхідного від'ємного імпульсів

$$U_n^+(p) = \frac{1}{p} \left(-DU_0 + U_0 \left(\sum_{i=1}^n e^{-(i-1)Tp} - e^{-DTp} \sum_{j=2}^n e^{-(j-2)Tp} \right) \right), \quad (2)$$

$$U_n^-(p) = \frac{1}{p} \left(-DU_0 + U_0 \left(\sum_{i=1}^n e^{-(i-1)Tp} \cdot (1 - e^{-DTp}) \right) \right). \quad (3)$$

Враховуючи (2), операторне зображення струму індуктивності на інтервалі дії n -го додатного імпульсу, де виконується умова $0 \leq t' \leq DT$

$$I_n^+(p) = U_n^+(p) \frac{(1 + RCp)}{(RLCp^2 + Lp + R)}, \quad (4)$$

отримано оригінали струму індуктивності протягом дії відповідно додатного n -го імпульсу при $t = (n-1)T + t'$ ($0 \leq t' \leq DT$) та від'ємного – при $DT \leq t' \leq T$.

На основі цих оригіналів встановлено вирази, які описують струм в індуктивності в усталеному режимі при $n \rightarrow \infty$

$$i_\infty^+(t) = \frac{(1-D)U_0}{R} - \frac{1}{RLC\omega_{\text{вн}}} \frac{\sqrt{A_{12}^2 + B_{12}^2}}{\sqrt{A_0^2 + B_0^2}} e^{-\alpha t'} \cos\left(\omega_{\text{вн}} t' + \arctg\left(\frac{B_{12}}{A_{12}}\right) - \arctg\left(\frac{B_0}{A_0}\right)\right), \quad (5)$$

де $A_{12} = (1 - RC\alpha)k_{12} - RC\omega_{\text{вн}}d_{12}$;

$B_{12} = RC\omega_{\text{вн}}k_{12} + (1 - RC\alpha)d_{12}$;

$k_{12} = U_0 \left[1 - e^{\alpha(D-1)T} \cos[\omega_{\text{вн}}(D-1)T]\right]$;

$d_{12} = U_0 e^{\alpha(D-1)T} \sin[\omega_{\text{вн}}(D-1)T]$;

$A_0 = \omega_{\text{вн}} \left[1 - e^{-\alpha T} \cos(\omega_{\text{вн}}T)\right] + \alpha e^{-\alpha T} \sin(\omega_{\text{вн}}T)$;

$B_0 = -\omega_{\text{вн}} e^{-\alpha T} \sin(\omega_{\text{вн}}T) + \alpha \left[1 - e^{-\alpha T} \cos(\omega_{\text{вн}}T)\right]$.

$$i_\infty^-(t) = -\frac{DU_0}{R} - \frac{1}{RLC\omega_{\text{вн}}} \frac{\sqrt{A_{14}^2 + B_{14}^2}}{\sqrt{A_0^2 + B_0^2}} e^{-\alpha t'} \cos\left(\omega_{\text{вн}} t' + \arctg\left(\frac{B_{14}}{A_{14}}\right) - \arctg\left(\frac{B_0}{A_0}\right)\right), \quad (6)$$

де $A_{14} = (1 - RC\alpha)k_{14} - RC\omega_{\text{вн}}d_{14}$;

$B_{14} = RC\omega_{\text{вн}}k_{14} + (1 - RC\alpha)d_{14}$;

$k_{14} = U_0 \left[1 - e^{\alpha DT} \cos(\omega_{\text{вн}}DT)\right]$;

$d_{14} = U_0 e^{\alpha DT} \sin(\omega_{\text{вн}}DT)$.

Встановлено вирази для напруги на РДС в усталеному режимі при $n \rightarrow \infty$

$$u_\infty^+(t) = (1-D)U_0 - \frac{1}{LC\omega_{\text{вн}}} \frac{\sqrt{k_{12}^2 + d_{12}^2}}{\sqrt{A_0^2 + B_0^2}} e^{-\alpha t'} \cos\left(\omega_{\text{вн}} t' + \arctg\left(\frac{d_{12}}{k_{12}}\right) - \arctg\left(\frac{B_0}{A_0}\right)\right), \quad (7)$$

$$u_\infty^-(t) = -DU_0 - \frac{1}{LC\omega_{\text{вн}}} \frac{\sqrt{k_{14}^2 + d_{14}^2}}{\sqrt{A_0^2 + B_0^2}} e^{-\alpha t'} \cos\left(\omega_{\text{вн}} t' + \arctg\left(\frac{d_{14}}{k_{14}}\right) - \arctg\left(\frac{B_0}{A_0}\right)\right) \quad (8)$$

і струму конденсатора

$$i_{C_\infty}^+(t) = \frac{1}{L\omega_{\text{вн}}} \frac{\sqrt{k_{12}^2 + d_{12}^2}}{\sqrt{\left(e^{-\alpha T} \sin(\omega_{\text{вн}}T)\right)^2 + \left(1 - e^{-\alpha T} \cos(\omega_{\text{вн}}T)\right)^2}} e^{-\alpha t'} \times \\ \times \cos\left(\omega_{\text{вн}} t' + \arctg\left(\frac{d_{12}}{k_{12}}\right) - \arctg\left(\frac{1 - e^{-\alpha T} \cos(\omega_{\text{вн}}T)}{e^{-\alpha T} \sin(\omega_{\text{вн}}T)}\right)\right); \quad (9)$$

$$i_{C_\infty}^-(t) = \frac{1}{L\omega_{\text{вн}}} \frac{\sqrt{k_{14}^2 + d_{14}^2}}{\sqrt{\left(e^{-\alpha T} \sin(\omega_{\text{вн}}T)\right)^2 + \left(1 - e^{-\alpha T} \cos(\omega_{\text{вн}}T)\right)^2}} e^{-\alpha t'} \times$$

$$\times \cos \left(\omega_{\text{вн}} t' + \arctg \left(\frac{d_{14}}{k_{14}} \right) - \arctg \left(\frac{1 - e^{-\alpha T} \cos(\omega_{\text{вн}} T)}{e^{-\alpha T} \sin(\omega_{\text{вн}} T)} \right) \right). \quad (10)$$

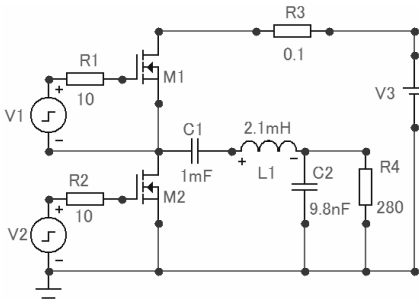


Рис. 4. Схема імітаційного моделювання вихідного каскаду в Micro-Cap 9

З метою верифікації отриманих теоретичних результатів проведено обчислення з використанням математичної системи MathCAD 15, виконано моделювання ВК ЕПРА за допомогою системи імітаційного моделювання Micro-Cap 9 (рис. 4), а також проведено експериментальні дослідження макету ЕПРА з параметрами, наведеними на рис. 4, робочою частотою $f = 38$ кГц та напругою живлення каскаду $U_0 = 415$ В. При цьому, як навантаження, використана люмінесцентна лампа (ЛЛ) типу ЛД-40.

На рис. 5, а наведено часову залежність для струму лампи, отриману за допомогою математичної моделі. Та ж залежність, отримана за допомогою системи імітаційного моделювання, наведена на рис. 5, б, а експериментальна – на рис. 5, в.

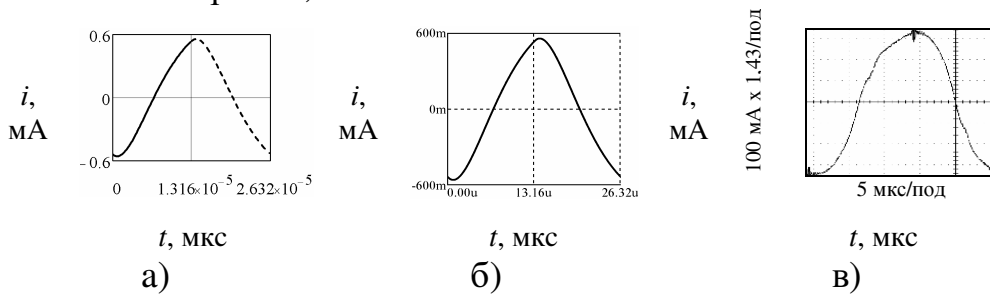


Рис. 5. Часові залежності для струму лампи, отримані: а) за розробленою математичною моделлю; б) шляхом імітаційного моделювання; в) за результатами експерименту

Отримано математичну модель ВК з урахуванням втрат в його компонентах. Вирази для напруги на лампі для усталеного режиму при $n \rightarrow \infty$

$$u_{\infty}^{+}(t) = \frac{(1-D)U_0 R}{R + r_k + r_e} - \frac{\sqrt{(R - r_k RC \alpha)^2 + (r_k RC \omega_{\text{вн}})^2}}{(R + r_k) LC \omega_{\text{вн}}} \frac{\sqrt{k_{12}^2 + d_{12}^2}}{\sqrt{A_0^2 + B_0^2}} e^{-\alpha t} \times \cos \left(\omega_{\text{вн}} t + \arctg \left(\frac{d_{12}}{k_{12}} \right) + \arctg \left(\frac{r_k RC \omega_{\text{вн}}}{R - r_k RC \alpha} \right) - \arctg \left(\frac{B_0}{A_0} \right) \right), \quad (11)$$

$$u_{\infty}^{-}(t) = -\frac{DU_0 R}{R + r_k + r_e} - \frac{\sqrt{(R - r_k RC \alpha)^2 + (r_k RC \omega_{\text{вн}})^2}}{(R + r_k) LC \omega_{\text{вн}}} \frac{\sqrt{k_{14}^2 + d_{14}^2}}{\sqrt{A_0^2 + B_0^2}} e^{-\alpha t} \times \cos \left(\omega_{\text{вн}} t + \arctg \left(\frac{d_{14}}{k_{14}} \right) + \arctg \left(\frac{r_k RC \omega_{\text{вн}}}{R - r_k RC \alpha} \right) - \arctg \left(\frac{B_0}{A_0} \right) \right), \quad (12)$$

де r_e – еквівалентний опір втрат, яким враховано втрати на котушці індуктивності, кондуктивні та комутаційні втрати; r_k – опір катода ЛЛ.

Аналіз математичної моделі показує, що врахування втрат компонентів ВК ЕПРА не суттєво підвищує точність розрахунків (наприклад, для струму лампи – 2,5 %), водночас, врахування втрат дає змогу оцінити їх вплив на ККД ЕПРА.

Виконано аналіз ВК в аперіодичному режимі, де корені характеристичного рівняння є дійсними, від’ємними і різними

$$p_{1,2} = -\alpha \pm \omega, \quad (13)$$

де $\omega = \omega_0 \sqrt{\xi^2 - 1}$.

Вирази для напруги на лампі в усталеному режимі при $n \rightarrow \infty$

$$u_{\infty}^{+}(t) = U_0(1 - D) + U_0 R \left(\frac{1 - e^{p_1 T(1-D)}}{(1 - e^{p_1 T}) p_1 (2RLCp_1 + L)} e^{p_1 t} + \frac{1 - e^{p_2 T(1-D)}}{(1 - e^{p_2 T}) p_2 (2RLCp_2 + L)} e^{p_2 t} \right); \quad (14)$$

$$u_{\infty}^{-}(t) = -DU_0 + U_0 R \left(\frac{1 - e^{-p_1 TD}}{(1 - e^{p_1 T}) p_1 (2RLCp_1 + L)} e^{p_1 t} + \frac{1 - e^{-p_2 TD}}{(1 - e^{p_2 T}) p_2 (2RLCp_2 + L)} e^{p_2 t} \right). \quad (15)$$

На основі об’єднання моделей для коливального та аперіодичного режимів, створено узагальнену математичну модель, яка дає змогу проводити аналіз ВК в умовах довільних значень його параметрів. Для верифікації результатів проведено імітаційне моделювання та експериментальні дослідження, де як навантаження ВК ЕПРА використано натрієву лампу високого тиску (НЛВТ) типу DeLux Sodium-70W. Розбіжність між результатами математичного моделювання та експерименту не перевищує 3 %.

У третьому розділі досліджено особливості регулювання потужності ЛЛ. Проаналізовано метод широтно-імпульсного регулювання потужності ЛЛ, на основі якого запропоновано новий підхід до розрахунку регульованих характеристик. Проведено аналіз схеми ВК ЕПРА методом основної гармоніки й отримано компактну математичну модель ВК у частотній області. Побудовано залежність коефіцієнта амплітуди струму лампи, який впливає на термін служби РДС, і коефіцієнта гармонік від коефіцієнта заповнення імпульсів. Розглянуто та проаналізовано ЕПРА, який побудовано шляхом об’єднання в одному каскаді послідовного перетворювача постійної напруги та напівмостового резонансного інвертора, навантаженого РДС.

Діюче значення напруги на лампі на основі виразів (7) і (8) записано у вигляді

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^{DT} u_{\infty}^{+}(t)^2 dt + \int_{DT}^T u_{\infty}^{-}(t)^2 dt \right)}, \quad (16)$$

а потужність лампи –

$$P = U^2 / R(P), \quad (17)$$

де $R(P)$ визначено за вольт-ватною характеристикою.

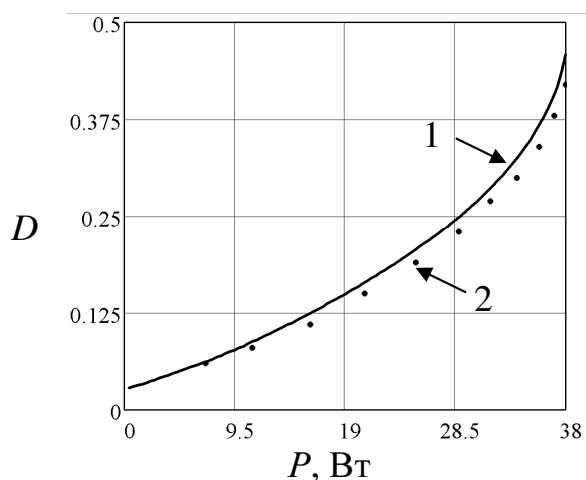


Рис. 6. Зв'язок потужності ЛЛ з коефіцієнтом заповнення імпульсів:
1 – теоретична крива;
2 – результати експерименту

$R = 280$ Ом при робочій частоті $f = 38$ кГц та напрузі живлення каскаду $U_0 = 415$ В. На рис. 6 продемонстровано високий ступінь відповідності між теоретичними та експериментальними результатами (відхилення між ними складає не більше 3 %). Регулювальна характеристика має невелику плавну нелінійність, що вказує на добру регулювальну властивість за методом широтно-імпульсного регулювання. Показано, що при розрахунку параметрів ВК необхідно узгоджувати характеристичний опір коливального контуру з напругою живлення каскаду таким чином, щоб коефіцієнт заповнення імпульсів при номінальній потужності в лампі наближався до 0,5, що дає змогу збільшити коефіцієнт корисної дії ВК.

На основі схеми заміщення отримано компактную математичну модель ВК у частотній області.

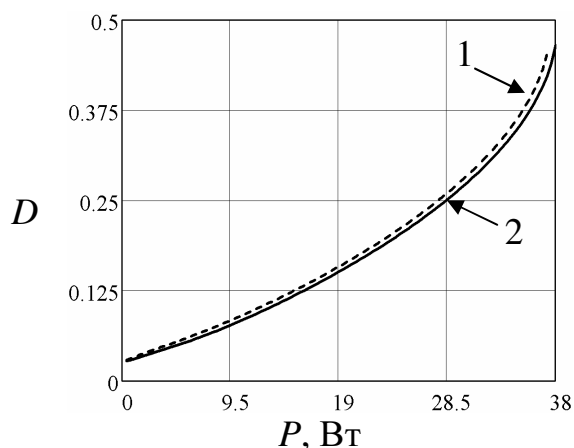


Рис. 7. Зв'язок потужності ЛЛ з коефіцієнтом заповнення імпульсів для різних моделей:
1 – для частотної моделі;
2 – для моделі в часовій області

Отримано рівняння, що описує регулювальну характеристику як залежність потужності лампи P від коефіцієнта заповнення імпульсів D

$$P = \frac{1}{T \cdot R(P)} \left(\int_0^{DT} u_{\infty}^+(t)^2 dt + \int_{DT}^T u_{\infty}^-(t)^2 dt \right). \quad (18)$$

Вираз для вольт-ватної характеристики

$$U(P) = 126 - 0,603P - 38,94e^{-0,383P}. \quad (19)$$

Шляхом чисельного розв'язку рівняння (18) з урахуванням (19) розраховано регулювальну характеристику (рис. 6).

З метою верифікації запропонованого підходу знято експериментальну характеристику "коефіцієнт заповнення – потужність" для ЛЛ ЛД-40 та ЕПРА з параметрами: $C = 9,8$ нФ, $L = 2,1$ мГн,

Встановлено вираз для регулювальної характеристики широтно-імпульсного методу регулювання

$$D(P) = \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{\pi P}{\sqrt{2} U_0 U(P)} \times \sqrt{(R + r - \omega^2 RLC)^2 + (\omega L + RrC\omega)^2}, \quad (20)$$

де ω – робоча частота, яка є незмінною в процесі регулювання.

На рис. 7 представлено зв'язок потужності ЛЛ ЛД-40 з коефіцієнтом заповнення імпульсів, отриманий за допомогою частотної моделі й моделі в часовій області. Встановлено, що при зменшенні коефіцієнта заповнення імпульсів амплітуди вищих гармонічних складових струму лампи

не будуть “підтягуватися” до амплітуди першої гармоніки.

Це відбувається при зменшенні коефіцієнта заповнення імпульсів за рахунок збільшення добротності коливального контура при зменшенні потужності РДС.

Встановлено моменти часу, в які струм лампи досягає мінімального та максимального значень

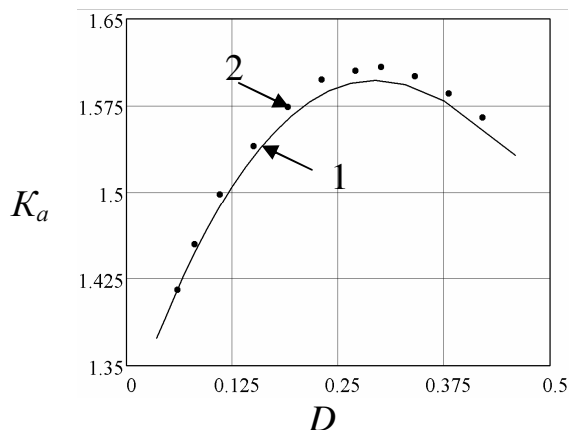


Рис. 8. Залежності коефіцієнта амплітуди струму люмінесцентної лампи від коефіцієнта заповнення імпульсів:
1 – розрахункова крива;
2 – розрахункові дані, отримані на основі експерименту

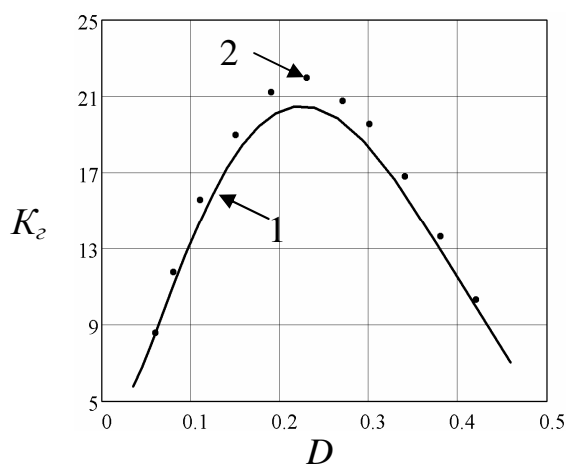


Рис. 9. Залежності коефіцієнта гармонік струму люмінесцентної лампи від коефіцієнта заповнення імпульсів:
1 – розрахункова крива;
2 – розрахункові дані, отримані на основі експерименту

$$t'_{\min} = \frac{\arctg\left(\frac{-\alpha}{\omega_{vl}}\right) - \arctg\left(\frac{d_{12}}{k_{12}}\right) + \arctg\left(\frac{B_0}{A_0}\right)}{\omega_{вл}}, \quad (21)$$

$$t'_{\max} = \frac{\arctg\left(\frac{-\alpha}{\omega_{vl}}\right) - \arctg\left(\frac{d_{14}}{k_{14}}\right) + \arctg\left(\frac{B_0}{A_0}\right)}{\omega_{вл}}. \quad (22)$$

Отримано аналітичні вирази для максимального та мінімального значень напруги на лампі, струму конденсатора і напруги індуктивності, а також вираз для діючого значення струму лампи

$$I_o = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^{DT} i_{\infty}^+(t)^2 dt + \int_{DT}^T i_{\infty}^-(t)^2 dt \right)}. \quad (23)$$

Отримано залежність коефіцієнта амплітуди струму лампи від коефіцієнта заповнення імпульсів, яку наведено на рис. 8.

Як бачимо з рис. 8, коефіцієнт амплітуди струму лампи не досягає граничного значення, яке дорівнює 1,7, що регламентовано нормативними документами на РДС. Отже, діапазон зміни коефіцієнта заповнення імпульсів за цим показником може лежати в межах від 0 до 0,5.

Залежність коефіцієнта гармонік струму лампи від коефіцієнта заповнення імпульсів, наведено на рис. 9. При зменшенні коефіцієнта заповнення імпульсів від 0,5 до 0, коефіцієнт гармонік струму лампи спочатку зростає за рахунок зростання вимушених гармонічних складових у спектрі вхідного сигналу, досягає максимуму, а потім зменшується за рахунок зростання добротності резонансної системи ЕПРА при малих потужностях ЛЛ.

Розроблено ресурсощадний високочастотний ЕПРА, схема якого наведена на рис. 10. У такому інверторі функції високочастотного інвертування та корекції коефіцієнта потужності об'єднано в одному каскаді.

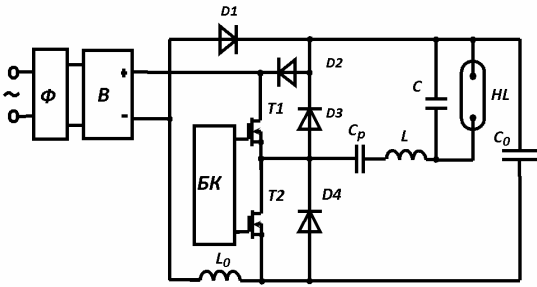


Рис. 10. Ресурсощадний високочастотний ЕПРА

На основі вищевказаних досліджень методів регулювання потужності проведено аналіз роботи як вихідного напівкаскаду, так і понижувального перетворювача, який формує споживаний від мережі струм.

На основі спектрального аналізу встановлено значення кута провідності $\Theta=130^\circ$, який визначає максимальну вихідну напругу U_0 живлення ВК, при якій ще задовольняються параметри якості електроенергії відповідно до стандарту МЕК-

1000-3-2.

Аналітичний вираз для миттєвого струму мережі, який споживає ЕПРА, має вигляд

$$i(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } (\omega_c t) \in \left[0, \frac{\pi - \theta}{2}\right] \cup \left(\frac{\pi + \theta}{2}, \pi\right]; \\ \frac{U_m}{R_e} \left(\frac{U_m}{U_0} \sin^2 \omega_c t - \sin \omega_c t \right), & \text{при } (\omega_c t) \in \left(\frac{\pi - \theta}{2}, \frac{\pi + \theta}{2}\right], \end{cases} \quad (24)$$

де $\theta = 2 \arccos(U_0 / U_{mc})$ – кут провідності діодів випрямляча; U_m – амплітуда напруги; ω_c – частота мережі; R_e – еквівалентний вхідний опір ЕПРА з боку мережі живлення.

Постійна складова струму, який споживається інверторною частиною ЕПРА

$$I_0 = \frac{U_{mc}}{\pi R_e} \left[\frac{U_{mc}}{2U_0} (\theta + \sin \theta) - 2 \sin \frac{\theta}{2} \right]. \quad (25)$$

Врахувавши, що $I_0 = U_0 / R_i$, отримано вираз

$$\frac{1}{\pi} \frac{R_i}{R_e} \left(\frac{U_{mc}^2}{U_0^2} \arccos \frac{U_0}{U_m} - \sqrt{\frac{U_{mc}^2}{U_0^2} - 1} \right) = 1. \quad (26)$$

Це рівняння зв'язує між собою всі основні параметри ЕПРА.

Виконано імітаційне моделювання запропонованого ресурсощадного високочастотного ЕПРА, а також проведено експериментальні дослідження. Аналіз отриманих результатів (рис. 11) свідчить, що коефіцієнт гармонік даного ЕПРА складає 30 %, а коефіцієнт потужності – 0,9, тобто вони задовольняють вимоги стандарту МЕК – 1000-3-2 до пристроїв класу С.

У четвертому розділі проаналізовано амплітудне, частотне та широтно-імпульсне регулювання потужності натрієвих ламп високого тиску (НЛВТ) ЕПРА.

Для амплітудного методу регулювання потужності встановлено аналітичний зв'язок між напругою живлення ВК та потужністю лампи

$$U_0(P) = \frac{\pi P}{\sqrt{2} U(P)} \sqrt{R^2 (1 - \omega^2 LC) + (\omega L)^2}. \quad (27)$$

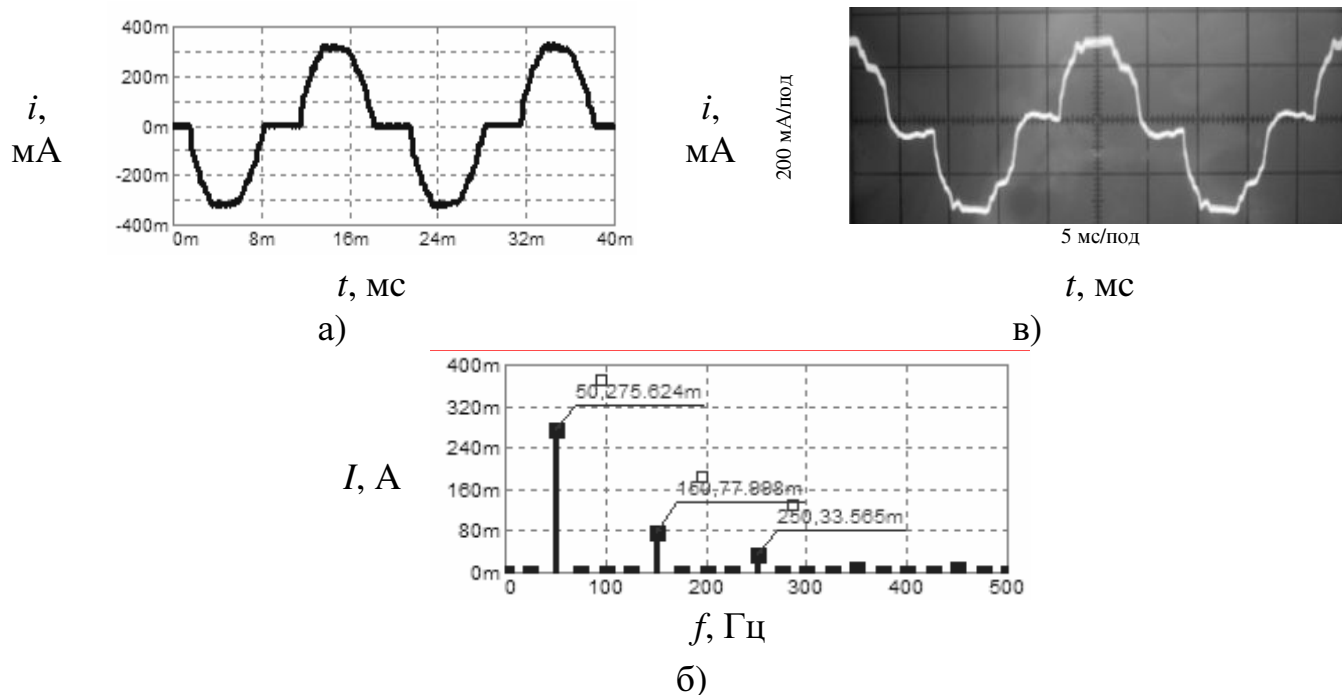


Рис. 11. Результати імітаційного моделювання та експериментальні дані:

а) струм мережі в системі імітаційного моделювання;

б) спектр струму мережі в системі імітаційного моделювання;

в) осцилограма струму мережі, отримана експериментальним шляхом

До виразу (27) входить напруга $U(P)$ на лампі, яка залежить від її потужності. Ця залежність визначається експериментально.

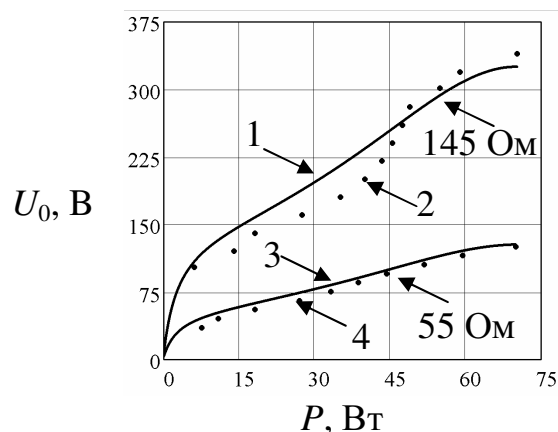


Рис. 12. Зв'язок потужності НЛВТ з напругою живлення каскаду для амплітудного методу:

1,3 – розрахункові криві;

2,4 – експериментальні дані

Виконано теоретичні та експериментальні дослідження ВК ЕПРА з параметрами: робоча частота $f = 41,5$ кГц, характеристичний опір $Z_0 = 145$ Ом і $Z_0 = 55$ Ом.

Побудовано зв'язок напруги живлення інвертора $U_0(P)$ з потужністю НЛВТ – регульовальні характеристики (рис. 12). Вони є близькими до лінійних і більше значення характеристичного опору вимагає подавання більшої напруги живлення ВК, що забезпечує краще регулювання потужності НЛВТ амплітудним методом.

Досліджено частотний метод регулювання потужності НЛВТ. Отримано вираз для робочої частоти ЕПРА як регульовального параметра, яка неявно залежить від робочої потужності лампи

$$f(P) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{-(L^2 - 2R^2LC) + \sqrt{(L^2 - 2R^2LC)^2 - 4(RLC)^2 \left[R^2 - \left(\sqrt{2}U_0R / \pi U(P) \right)^2 \right]}}{2(RLC)^2}}. \quad (28)$$

Вираз для вольт-ватної характеристики НЛВТ

$$U(P) = 3,7266 \cdot 10^{-6} P^4 - 0,00023293 P^3 - 0,020728 P^2 + 2,3033 P + 6,582. \quad (29)$$

Використовуючи вирази (28), (17) і (29), побудовано зв'язок потужності НЛВТ з робочою частотою $f(P)$, а також знято експериментальні залежності на ВК з тими ж параметрами, що й для амплітудного методу регулювання (рис. 13).

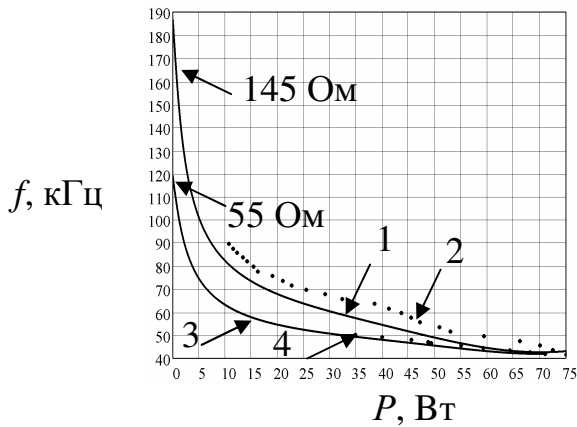
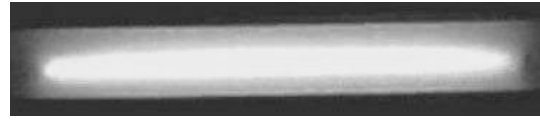
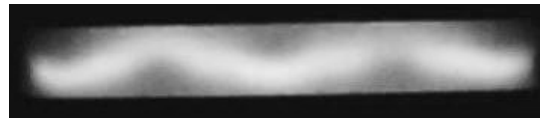


Рис. 13. Зв'язок потужності НЛВТ з робочою частотою для частотного методу:
1,3 – розрахункові криві;
2,4 – експериментальні дані



а)



б)

Рис. 14. Дуговий розряд НЛВТ типу DeLux Sodium-70W:
а) на робочій частоті 41,5 кГц;
б) на частоті акустичного резонансу 38 кГц

Встановлено, що при малих значеннях характеристичного опору ($Z_0 = 55 \text{ Ом}$) частота змінюється в діапазоні від 40 до 50 кГц. Це викликає зміну потужності лампи від 75 до 35 Вт, тобто лампа гасне приблизно на 50 % своєї номінальної потужності. При $Z_0 = 145 \text{ Ом}$ діапазон регулювання по частоті становить від 40 до 90 кГц і відповідно потужність змінюється від 75 до 10 Вт, що свідчить про добру плавність регулювання.

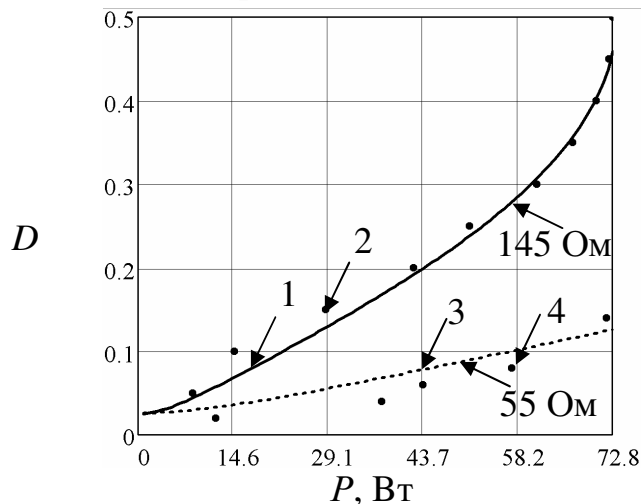


Рис. 15. Залежність потужності НЛВТ від коефіцієнта заповнення імпульсів для широтно-імпульсного методу:
1,3 – розрахункові криві;
2,4 – експериментальні дані

Проте при частотному регулюванні може проявитися явище акустичного резонансу, зумовлене стоячими хвилями тиску в розряді, яке погіршує якість освітлення, а за певних умов може зруйнувати розрядну колбу.

На рис. 14 показано дуговий розряд НЛВТ типу DeLux Sodium-70W на робочій частоті 41,5 кГц та на частоті акустичного резонансу 38 кГц.

У роботі відзначено, що при регулюванні робочої частоти необхідно знати смугу робочих частот, в якій відсутній акустичний резонанс.

У роботі відзначено, що при регулюванні робочої частоти необхідно знати смугу робочих частот, в якій відсутній акустичний резонанс.

Експериментально та аналітично досліджено залежності "коефіцієнт заповнення – потужність" (рис. 15) для НЛВТ типу DeLux Sodium-70W на ВК з аналогічними параметрами, як і для амплітудного та частотного методів регулювання. Аналіз виконано на основі математичної моделі в часовій області.

Експериментально досліджено залежності світлового потоку від коефіцієнта заповнення імпульсів (рис. 16) та потужності НЛВТ типу DeLux Sodium-70W (рис. 17).

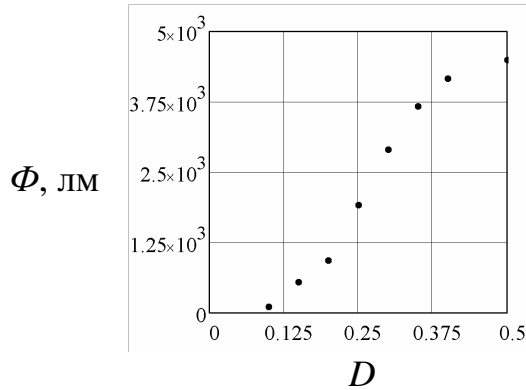


Рис. 16. Залежність світлового потоку від коефіцієнта заповнення імпульсів для НЛВТ типу DeLux Sodium-70W

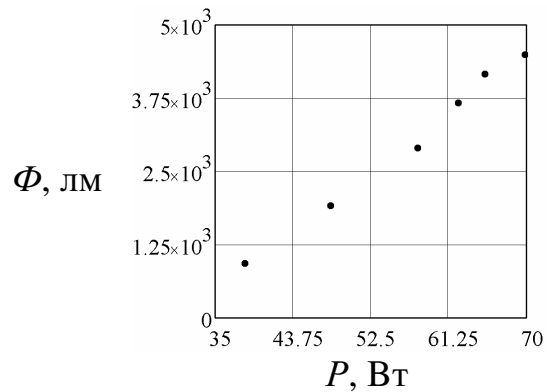


Рис. 17. Залежність світлового потоку від потужності для НЛВТ типу DeLux Sodium-70W

Проведено аналітичні та експериментальні дослідження форми напруг і струмів ВК ЕПРА НЛВТ, у результаті яких побудовано часові залежності для струму лампи при $D = 0,5$ і $D = 0,2$.

Встановлено залежність коефіцієнта амплітуди струму лампи від коефіцієнта заповнення імпульсів для НЛВТ (рис. 18), а також залежність коефіцієнта гармонік струму лампи від коефіцієнта заповнення імпульсів (рис. 19).

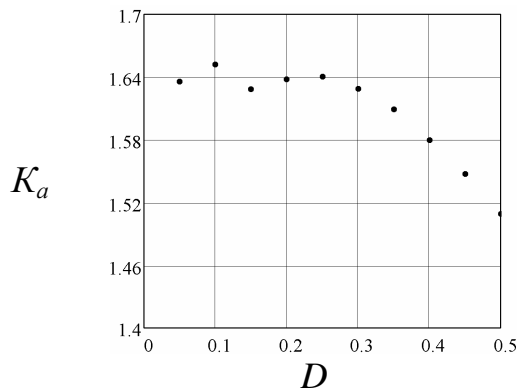


Рис. 18. Залежність коефіцієнта амплітуди струму НЛВТ від коефіцієнта заповнення імпульсів

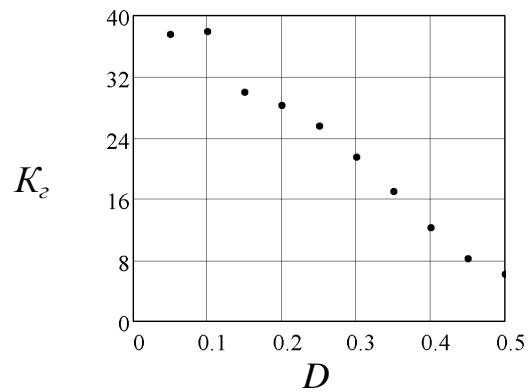


Рис. 19. Залежність коефіцієнта гармонік струму НЛВТ від коефіцієнта заповнення імпульсів

Показано, що на відміну від ЛЛ для НЛВТ за рахунок низьких значень добротності коливального контура відбувається збільшення коефіцієнта амплітуди і коефіцієнта гармонік струму лампи, оскільки амплітуди вищих гармонічних складових "підтягуються" до амплітуди першої гармоніки, як і у випадку ЛЛ, де вони не перевищують регламентованого значення.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано науково-прикладну задачу дослідження регульовальних властивостей комплексу «Електронний пускорегульовальний апарат – розрядне джерело світла» в широкому діапазоні зміни його робочих потужностей на основі розроблених математичних моделей вихідних каскадів.

При цьому отримано такі основні результати:

1. Розроблено математичні моделі вихідного каскаду ЕПРА, які представлено у вигляді аналітичних виразів для миттєвих значень напруг і струмів у колах інвертора, що дало змогу підвищити точність аналізу електричних режимів ЕПРА та досліджувати методи регулювання потужності комплектом «ЕПРА–РДС».

2. Шляхом поєднання аналітичних виразів для коливального та аперіодичного режимів роботи ЕПРА створено узагальнену математичну модель, яка забезпечує проведення аналізу в умовах довільних значень параметрів вихідного каскаду. Верифікацію отриманих результатів виконано шляхом імітаційного моделювання та експерименту з використанням люмінесцентної лампи та натрієвої лампи високого тиску. Розбіжність між результатами математичного моделювання та експерименту не перевищує 3 %.

3. Отримано математичну модель вихідного каскаду ЕПРА з урахуванням втрат у його компонентах. Показано, що врахування втрат дає змогу спрогнозувати ККД вихідного каскаду на стадії проектування ЕПРА, а похибки струмів та напруг у його компонентах зменшуються незначно (приблизно від 4–5 % до 2,5 %).

4. Отримано аналітичний опис регульовальної характеристики для широтно-імпульсного методу регулювання потужності РДС як залежності потужності лампи від коефіцієнта заповнення імпульсів вихідного каскаду ЕПРА, на основі врахування нелінійності її вольт-ватної характеристики у широкому діапазоні зміни її потужності (100:1 – для ЛЛ; 2:1 – для НЛВТ). Показано, що для забезпечення високого ККД необхідно узгоджувати характеристичний опір резонансної системи з напругою живлення його вихідного каскаду так, щоб коефіцієнт заповнення імпульсів при номінальній потужності в лампі наближався до 0,5. Експериментально встановлено, що залежність світлового потоку лампи від коефіцієнта заповнення імпульсів близька до лінійної.

5. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено залежності коефіцієнта амплітуди струму РДС та коефіцієнта гармонік цього струму від робочої потужності в процесі її регулювання високочастотним ЕПРА. Показано, що при зміні коефіцієнта заповнення імпульсів у межах від 0,5 до майже нульового значення коефіцієнт амплітуди струму лампи не досягає граничного значення, що дорівнює 1,7, а коефіцієнт гармонік струму при цьому спочатку зростає за рахунок зростання гармонічних складових у спектрі вхідного сигналу, досягає максимуму, а потім зменшується за рахунок зростання добротності резонансної системи ЕПРА при малих потужностях.

6. Шляхом порівняння моделей вихідного каскаду ЕПРА в частотній та часовій областях показано переваги моделі у часовій області при дослідженні широтно-імпульсного методу регулювання потужності. Встановлено, що для аналізу регулювання потужності натрієвої лампи високого тиску доцільно використовувати

модель вихідного каскаду у часовій області. Водночас, значно компактніша модель у частотній області спрощує такий аналіз для люмінесцентної лампи у зв'язку зі специфікою залежності опору лампи від потужності.

7. Розроблено енергоефективний та ресурсощадний високочастотний ЕПРА, у якому понижувальний коректор коефіцієнта потужності та напівмостовий резонансний інвертор, що працюють синхронно, використовують спільний силовий транзисторний ключ, що дало змогу зекономити один ключ, його драйвер та підвищити ККД. Результати імітаційного моделювання та експерименту показали, що коефіцієнт гармонік струму, який споживає ЕПРА від мережі живлення, не перевищує 30 %, а коефіцієнт потужності ЕПРА складає 0,9, що задовольняє вимоги стандартів на якість споживання електроенергії.

8. Отримані у дисертаційній роботі наукові результати впроваджено в Тернопільських ТОВ “ОСП Корпорація ВАТРА” та «Тернопільському конструкторському бюро радіозв'язку “Стріла”», а також у навчальний процес підготовки фахівців за спеціальностями “Світлотехніка та джерела світла” й “Електротехнічні системи електроспоживання” Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лупенко А. Однокаскадний електронний баласт з коректором форми споживаного струму / А. Лупенко, В. Натяга, І. Сисак // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль, 2008. – Т. 13, № 2. – С. 108–115.

2. Лупенко А. Математична модель вихідного каскаду електронного пускорегулювального апарата в коливальному режимі / А. Лупенко, Л. Мовчан, В. Натяга, І. Сисак // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль, 2010. – Т. 15, № 2. – С. 135–145.

3. Лупенко А.М. Математична модель вихідного каскаду електронного пускорегулювального апарату в коливальному режимі з урахуванням втрат / А.М. Лупенко, Л.Т. Мовчан, І.М. Сисак // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2010. – № 2. – С. 69–75.

4. Лупенко А.М. Математична модель вихідного каскаду електронного пускорегулювального апарата в аперіодичному режимі / А.М. Лупенко, Л.Т. Мовчан, І.М. Сисак // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця, 2011. – № 5 (98). – С. 99–103.

5. Лупенко А. Комплексна математична модель інвертора напруги для електронного пускорегулювального апарата / А. Лупенко, Л. Мовчан, І. Сисак, В. Сай // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – Тернопіль, 2011. – Т. 16, № 4. – С. 143–150.

6. Лупенко А. Метод широтно-імпульсного регулювання потужності розрядних джерел світла / А. Лупенко, Л. Мовчан, В. Натяга, І. Сисак // Технічна електродинаміка / Інститут електродинаміки НАН України. – Київ, 2011. – № 2. – С. 24–29.

7. Лупенко А.М. Дослідження форми напруг і струмів вихідного каскаду електронного баласту люмінесцентної лампи / А.М. Лупенко, Л.Т. Мовчан,

І.М. Сисак // Світлотехніка та електроенергетика / Харківська національна академія міського господарства. – Харків, 2011. – № 3 (27). – С. 20–25.

8. Однокаскадний електронний баласт з коректором форми споживаного струму: матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції [“Світлотехніка й електроніка: Історія, проблеми й перспективи”], (Тернопіль, 20-22 травня 2008 р.). – Т.: ТДТУ, 2008. – 31–32 с.

9. Багатофункціональний електронний пускорегулювальний апарат: матеріали дванадцятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, (Тернопіль, 14–15 травня 2008 р.). – Т.: ТДТУ, 2008. – 189 с.

10. Аналіз вихідного каскаду електронного пускорегулювального апарату в коливальному режимі: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції [“Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій”], (Тернопіль, 19–21 травня 2010 р.). – Т.: ТНТУ, 2010. – 357 с.

11. Коливальний режим вихідного каскаду електронного пускорегулювального апарату: матеріали III-тньої Міжнародної науково-технічної конференція [“Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах”], (Луцьк, 28–30 червня 2010 р.). – Л.: ЛНТУ, 2010. – 135–137 с.

12. Аналіз вихідного каскаду електронного пускорегулювального апарату в аперіодичному режимі: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції [“Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій”], (Тернопіль, 19–21 травня 2010 р.). – Т.: ТНТУ, 2010. – 356 с.

13. Аперіодичний режим вихідного каскаду електронного пускорегулювального апарату: тези доповідей X міжнародної конференції [“Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010)”], (Вінниця, 19–21 жовтня 2010 р.). – В.: ВНТУ, 2010. – 176 с.

14. Дослідження широтно-імпульсного регулювання потужності люмінесцентних ламп: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції [“Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій”], (Тернопіль, 19–21 травня 2010 р.). – Т.: ТНТУ, 2010. – 355 с.

15. Апроксимація вольт-амперної характеристики натрієвої лампи методом найменших квадратів: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції [“Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій”], (Тернопіль, 19–21 травня 2010 р.). – Т.: ТНТУ, 2010. – 354 с.

16. Математична модель вихідного каскаду електронного пускорегулювального апарату в коливальному режимі з урахуванням втрат: матеріали науково-технічної конференції [“Сучасний стан і перспективи розвитку світлотехніки та електроенергетики”], (Тернопіль, 19 травня 2011 р.). – Т.: ТНТУ, 2011. – 55–56 с.

17. Комплексна математична модель інвертора напруги для електронного пускорегулювального апарату: збірник тез доповідей XV наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, (Тернопіль, 14–15 грудня 2011 р.). – Т.: ТНТУ, 2011. – 153 с.

18. Дослідження форми напруг і струмів вихідного каскаду електронного баласту люмінесцентної лампи: матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції [“Сучасні проблеми світлотехніки та електроенергетики”], (Харків, 13–14 квітня 2011 р.). – Х.: ХНАМГ, 2011. – 147–149 с.

19. Амплітудне регулювання потужності натрієвих ламп високого тиску електронними пускорегулювальними апаратами: матеріали науково-технічної конференції [“Сучасний стан і перспективи розвитку світлотехніки та електроенергетики”], (Тернопіль, 19 травня 2011 р.). – Т.: ТНТУ, 2011. – 53–54 с.

20. Частотне регулювання потужності натрієвих ламп високого тиску електронними пускорегулювальними апаратами: матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції [“Світлотехніка й електроенергетика: Історія, проблеми, перспективи”], (Тернопіль, 24–26 квітня 2012 р.). – Т.: ТНТУ, 2012. – 111–112 с.

21. Метод широтно-імпульсного регулювання потужності натрієвих ламп високого тиску електронними пускорегулювальними апаратами: збірник тез доповідей XVI наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, [Том II, “Матеріалознавство та машинобудування”], (Тернопіль, 5–6 грудня 2012 р.). – Т.: ТНТУ, 2012. – 106 с.

АНОТАЦІЯ

Сисак І.М. Регулювання потужності розрядних джерел світла високочастотними електронними пускорегулювальними апаратами. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.07 – світлотехніка та джерела світла. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2013.

Дисертаційна робота присвячена розробленню математичних моделей вихідних каскадів високочастотних електронних пускорегулювальних апаратів та дослідженню на їх основі регулювальних властивостей комплексу “електронний пускорегулювальний апарат – розрядне джерело світла” в широкому діапазоні зміни його робочих потужностей. Розроблено математичні моделі вихідного каскаду електронного пускорегулювального апарата у вигляді аналітичних виразів для миттєвих значень його напруг і струмів. Створено узагальнену математичну модель вихідного каскаду, яка забезпечує проведення його аналізу при довільних значеннях параметрів. Отримано математичну модель вихідного каскаду з урахуванням втрат у його компонентах. Отримано аналітичний опис регулювальних характеристик електронного пускорегулювального апарата для широтно-імпульсного, амплітудного та частотного методів регулювання потужності розрядних джерел світла на основі врахування нелінійності їх вольт-ватної характеристики у широкому діапазоні потужностей. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено залежності коефіцієнта амплітуди струму та коефіцієнта гармонік струму розрядного джерела світла від його робочої потужності. Розроблено енергоефективний та ресурсощадний електронний пускорегулювальний апарат, який забезпечує високу якість споживання електроенергії та регулювання

потужності розрядних джерел світла на базі об'єднання понижувального коректора коефіцієнта потужності та напівмостового інвертора, що працюють синхронно.

Ключові слова: вихідний каскад, електронний пускорегулювальний апарат, розрядне джерело світла, коливальний режим, аперіодичний режим, регулювання потужності.

АННОТАЦІЯ

Сысак И.М. Регулирование мощности разрядных источников света высокочастотными электронными пускорегулирующими аппаратами. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.07 – светотехника и источники света. – Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2013.

Диссертационная работа посвящена разработке математических моделей выходных каскадов высокочастотных электронных пускорегулирующих аппаратов и исследованию на их основании регулировочных свойств комплекта "электронный пускорегулирующий аппарат – разрядный источник света" в широком диапазоне изменения его рабочих мощностей.

Разработаны математические модели выходного каскада электронного пускорегулирующего аппарата, представленные в виде аналитических выражений для мгновенных значений напряжений и токов в цепях резонансного инвертора, что дало возможность повысить точность анализа электрических режимов электронных пускорегулирующих аппаратов и исследовать методы регулирования мощности комплектом «Электронный пускорегулирующий аппарат – разрядный источник света».

Путем объединения аналитических выражений для колебательного и апериодического режимов работы электронного пускорегулирующего аппарата разработано математическую модель, которая дает возможность проводить анализ в условиях произвольных значений параметров выходного каскада аппарата.

Разработано математическую модель выходного каскада электронного пускорегулирующего аппарата с учетом потерь в его компонентах, которая позволяет прогнозировать коэффициент полезного действия выходного каскада на стадии проектирования электронных пускорегулирующих аппаратов.

Получено аналитическое выражение регулировочной характеристики для широтно-импульсного метода регулирования мощности разрядных источников света в широком диапазоне изменения мощности на основе учета нелинейности их вольт-ваттных характеристик.

Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено зависимости коэффициента амплитуды тока разрядной лампы и коэффициента гармоник от рабочей мощности в процессе регулирования высокочастотным электронным пускорегулирующим аппаратом.

Путем сравнения моделей выходного каскада электронного пускорегулирующего аппарата в частотной и временной областях показаны преимущества модели во временной области при исследовании широтно-

импульсного метода регулирования мощности. Установлено, что для анализа регулирования мощности натриевой лампы высокого давления целесообразно использовать модель выходного каскада во временной области. В то же время компактная модель в частотной области упрощает такой анализ для люминесцентной лампы в связи со спецификой зависимости сопротивления лампы от мощности.

Предложено энергоэффективный и ресурсосберегающий высокочастотный электронный пускорегулирующий аппарат, в котором синхронно работающие понижающий корректор коэффициента мощности и полумостовой резонансный инвертор используют общий силовой транзисторный ключ, что дало возможность сэкономить высоковольтный ключ, его драйвер и повысить коэффициент полезного действия.

Ключевые слова: выходной каскад, электронный пускорегулирующий аппарат, разрядный источник света, колебательный режим, апериодический режим, регулирование мощности.

ABSTRACT

I. Sysak. Power control of discharge light sources by high-frequency electronic ballasts. – Manuscript.

The dissertation for the scientific degree of Candidate of Sciences (Engineering) on speciality 05.09.07 – Lighting Engineering and Light Sources. – Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, 2013.

The dissertation is devoted to the development of mathematical models of output stages of high-frequency electronic ballasts and investigation of "electronic ballasts - discharge light sources" control properties in a wide range of changes of its operation power. Mathematical models of the electronic ballasts output stage in the analytical form for the instantaneous voltages and currents have been developed. Generalized mathematical model that provides analysis of the output stage for arbitrary values of its parameters has been created. A mathematical model of the output stage taking into account the losses in its component has been obtained. The analytical description of the electronic ballasts control performance for pulse-width, voltage and frequency methods for discharge light sources power control taking into consideration their power-voltage characteristics nonlinearity in a wide range of power has been obtained. Dependences the current amplitude crest factor and total harmonic distortion of discharge light source on its operation power have been theoretically interpreted and experimentally testified, which provides high quality power consumption and discharge light source power control, basing on the combining of step-down power factor corrector and half-bridge inverter, which work synchronously has been developed.

Keywords: output stage, electronic ballast, discharge light source, underdamped mode, overdamped mode, power control.

Підписано до друку 21.11.2013 р.
Папір ксероксний. Times New Roman
Обл. вид. арк. 0,9
Наклад 100 прим. Зам. № 2260

Видавництво Тернопільського національного
технічного університету імені Івана Пулюя

вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001